

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.02.017

伞裙破损对接触网斜腕臂绝缘子电场特性的影响

段承成¹, 张廷荣¹, 胡延文¹, 白玉发²

(1. 兰州交通大学自动化与电气工程学院, 兰州 730070; 2. 中国铁路青藏集团有限公司, 西宁 810000)

摘要: 西部地区自然环境复杂, 因人为及非人为因素造成接触网瓷质绝缘子破损的情况较多。为了研究伞裙破损对接触网安全运行的影响, 文中建立了不同破损大小、不同破损位置、两处破损组合、不同表面状态下斜腕臂绝缘子的仿真模型, 利用有限元软件分析了其电场分布特性。仿真结果表明: 伞裙破损半径越大, 破损处表面电场强度越大, 相比完好绝缘子, 破损半径达到 30 mm 时电场强度增加了 30.11%; 相同破损半径时, 伞裙破损出现在高压端时电场强度增加幅度最大; 两处破损时, 相对位置夹角越大, 电场强度增加幅度越小, 当破损在高压端与中压端且夹角为 0° 时, 电场强度增加了 47.31%; 当绝缘子破损处积水或上表面覆水时, 电场强度急剧增加, 相比完好绝缘子, 电场强度分别增加了 129.57% 和 260.22%。研究结果可为斜腕臂绝缘子的运营检修提供数据支撑。

关键词: 接触网; 斜腕臂绝缘子; 伞裙破损; 有限元; 电场分布

Influence of Damaged Shed on Electric Field Characteristics of Catenary Oblique Wrist Arm Insulators

DUAN Chengcheng¹, ZHANG Tingrong¹, HU Yanwen¹, BAI Yufa²

(1. College of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. China Railway Qinghai-Tibet Group Co., Ltd., Xining 810000, China)

Abstract: The natural environment in western regions of China is complex, leading to a numerous instances of damage to the catenary porcelain insulators due to both human and non-human factors. For studying the influence of the damaged shed on safe operation of the catenary systems, the simulation model of the catenary oblique swage arm insulators simulation with different damage magnitude, different damage locations, combination of two damage positions and different surface conditions is set up, and its electric field distribution characteristics are analyzed using finite element software. The simulation results show that the larger the damage radius of the damaged shed, the higher the surface electric field intensity at the damaged position and, compared with intact insulators, the electric field intensity is increased by 30.11% with the damaged radius reaching 30 mm. In case of same damaged radius and the shed damage at high-voltage side, the increase amplitude of the electric field intensity is the maximum. While, in case of damage at two positions, the larger the relative positions, the smaller the increase amplitude of electric field intensity. When the damage is between the high voltage and low voltage ends and the inclination angle is 0°, the electric field intensity is increased by 47.31%. In case of water accumulation or surface covered with water at the damaged insulator, the electric field intensity is increased significantly and, compared with the intact insulator, the electric field intensity is increased by 129.57% and 260.22%, respectively. The study findings can provide valuable data support for the operation and maintenance of catenary oblique swage arm insulators.

Key words: catenary system; oblique wrist arm insulator; shed damage; finite element; electric field distribution

收稿日期: 2025-07-21; 修回日期: 2025-10-01

基金项目: 兰州交通大学青年科学基金项目(1200061169, 1520020821)。

Project Supported by Young Scholars Science Foundation of Lanzhou Jiaotong University(1200061169, 1520020821).

0 引言

国内西部地区电气化铁路沿线自然环境复杂, 因强风沙、人为及非人为等因素可能造成接触网瓷质绝缘子表面憎水性能下降, 甚至出现微裂纹及破损等情况^[1-3]。绝缘子伞裙破损不仅会使爬电距离减小, 且因安装位置原因, 容易在上表面破损处积污, 长期积污受潮会引起电场畸变, 进而加剧电势分布不均, 影响绝缘子污闪特性, 最终造成严重后果^[4-6]。通过实际调研青海部分地区接触网腕臂绝缘子的破损状况, 发现斜腕臂绝缘子出现破损的概率较平腕臂绝缘子更大, 个别瓷质斜腕臂绝缘子伞裙破损直径最大可达伞裙直径的40%左右, 究其原因是在其所处位置相对较低。

目前国内外对接触网腕臂绝缘子的研究主要集中在使用环境^[7-8]、污秽类型^[9-10]、污秽程度^[11-12]、伞

裙类型^[13-14]、温度影响^[15-16]、疏水性^[17-18]等方面。文[19-21]进一步研究了大风区接触网设备选择与绝缘子存在缺陷时对其周围电场的影响。

文中选择针对斜腕臂绝缘子不同破损状况为研究对象, 结合现场使用环境并针对其存在缺陷的典型问题进行分析, 旨在研究接触网斜腕臂绝缘子不同破损大小、不同破损位置以及不同破损组合、不同表面状态下对绝缘子电场变化的影响, 研究结果对西部地区强风沙环境下的斜腕臂绝缘子运营检修具有重要意义。

1 接触网腕臂绝缘子模型

1.1 接触网腕臂绝缘子仿真模型的建立

为开展后续实验, 文中选取QBSN-25/12瓷质斜腕臂绝缘子作为研究对象, 建立钢脚、钢帽、伞裙等部分组成的三维模型, 见图1^[22]。

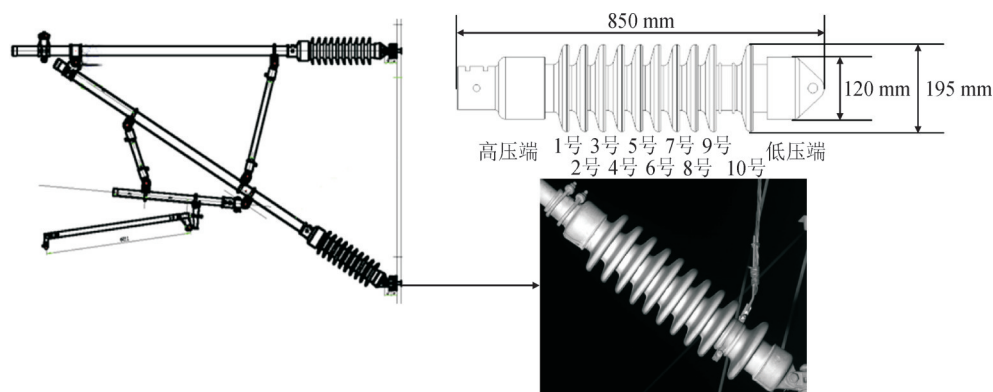


图1 接触网斜腕臂绝缘子模型图

Fig. 1 Catenary oblique wrist arm insulator model drawing

斜腕臂绝缘子串由10片伞裙组成, 工作电压27.5 kV, 为方便后文说明, 斜腕臂绝缘子从接触网的高压端(左侧)到接地端(右侧)编号为1-10号。斜腕臂绝缘子具体参数见表1。

表1 斜腕臂绝缘子参数

Table 1 Oblique wrist arm insulator parameters

型号	结构高度/mm	爬电距离/mm	伞裙直径/mm
QBSN-25/12	850	1 200	195

1.2 绝缘子破损模型

文中调研青海部分地区接触网斜腕臂绝缘子破损状况近百组, 统计缺损位置及大小, 见图2。

由图2可知, 绝缘子两端出现破损的情况较多, 并且伞裙破损半径小于20 mm所占的比例较大。伞裙破损俯视图, 见图3。文中分别选取破损半径为10、20、30 mm时为主要实验对象, 对绝缘子周围电场分布进行分析。

将建立好的三维模型导入Comsol软件中见图4,

并以绝缘子中心为中心设置500 mm×1 500 mm的圆柱形空气域中, 模拟绝缘子在自然空气中的工作状态^[23]。为了提高计算精度同时降低计算量, 文中对绝缘子周围网格进行较为细化的划分, 对远离绝缘子部分进行稀疏的网格划分。网格单元数量为1 600万左右。

1.3 绝缘子电场分布的计算原理

由于接触网在工频交流电压下工作, 交流电磁波长远大于绝缘子两极间距, 电场在任一瞬间可近似为静电场^[24], 因此绝缘子串表面及周围介质中的电场满足:

$$\oint E \cdot dl = 0 \quad (1)$$

$$D = \varepsilon E \quad (2)$$

基本方程的微分形式为:

$$\nabla \cdot E = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (4)$$

式(3)、(4)中: E 为介质区的电场强度; D 为电位

移矢量; ρ 为空间电荷体密度。

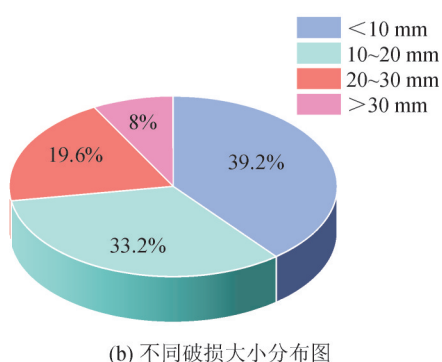
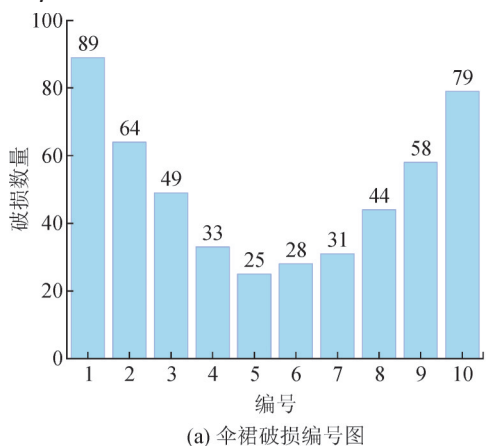


图2 破损绝缘子统计图

Fig. 2 Statistical chart of damaged insulators

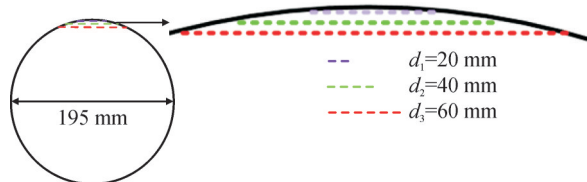


图3 伞裙破损俯视图

Fig. 3 Top view of damaged shed

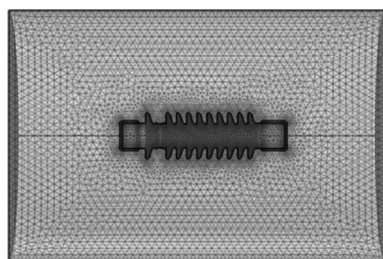


图4 绝缘子模型网格划分图

Fig. 4 Grid division diagram of insulator model

静电场中微分形式下,电场强度等于点位的负梯度。

$$E = -\nabla \cdot \varphi \quad (5)$$

式(5)中, φ 为静电场的电位。

在固定空间求取电场时,此时边界为电极表面,场域为边界以外的空间,此时求解区域中满足拉普拉斯方程

$$\nabla \cdot (\nabla \varphi) = 0 \quad (6)$$

对于静电场的三维模型,应该满足变分问题

$$\begin{cases} \Omega: \min I(\varphi) = \int_{\Omega} \left[\frac{1}{2} \varepsilon (\nabla \varphi)^2 - \rho \varphi \right] d\Omega \\ \varphi = \varphi_0 \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中: Ω 为求解区域; φ_0 为初置电位。

在求解域中任意两个相邻的介质分界面上,均满足如下方程:

$$\varphi_1 = \varphi_2 \quad (8)$$

$$\varepsilon_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial n} = \varepsilon_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial n} \quad (9)$$

式(8)、(9)中: φ_1 、 φ_2 分别为两种介质分界面电位; ε_1 和 ε_2 分别为两种介质的相对介电常数; n 为法矢量。

2 接触网腕臂绝缘子伞裙破损电场分析

基于有限元法对斜腕臂绝缘子电场分布进行数值计算,在有限元仿真软件 Comsol 中,对腕臂绝缘子高压端连接金具设置为接触网最高工作电压 29 kV 的峰值,约为 41 kV ($29\sqrt{2}$ kV),低压端金具设置为零电位,其中后续实验所需材料设置参数见表 2^[25]。

表2 电场仿真基本参数

Table 2 Basic parameters of electric field simulation

物理介质	相对介电常数	电导率/(S·m ⁻¹)
空气	1	1.00×10 ⁻⁵⁰
金具	1×10 ⁸	1.12×10 ⁷
陶瓷	6	1.00×10 ⁻¹²
湿污	83	0.03

将绝缘子模型导入 Comsol 后,对其进行电场仿真,计算得到绝缘子在不同情况下的空间电场分布,对不同状态下的绝缘子表面电场分布进行研究分析,将计算结果进行可视化处理。

2.1 伞裙不同破损大小的腕臂绝缘子

在同一伞裙下不同破损半径对腕臂绝缘子电场分布影响,见图 5。

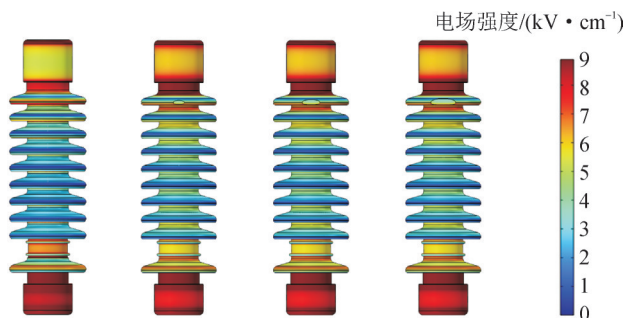


图5 不同破损大小下绝缘子表面电场分布

Fig. 5 Electric field distribution on insulator surface under different damaged sizes

由图5可知,依次为完整绝缘子电场分布图,高压端1号伞裙破损半径为10、20、30 mm时的电场分布图。其中完整绝缘子高压端1号伞裙处最大场强为1.86 kV/cm。当高压端1号伞裙破损半径为10 mm时,破损处表面场强与完整时增加较小,增加到1.91 kV/cm,较完整时提升了2.61%左右。当伞裙破损半径为20、30 mm时,破损处表面电场强度逐步增加,30 mm 破损半径时破损处最大场强增加到2.42 kV/cm,较完整时提升了30.11%。

针对图5中4种绝缘子进行仿真分析,得到其沿面电场分布图,当绝缘子伞裙破损越大时,破损所在部位电场强度也随之增加,并且破损半径越大,绝缘子的爬电距离缩短,见图6。

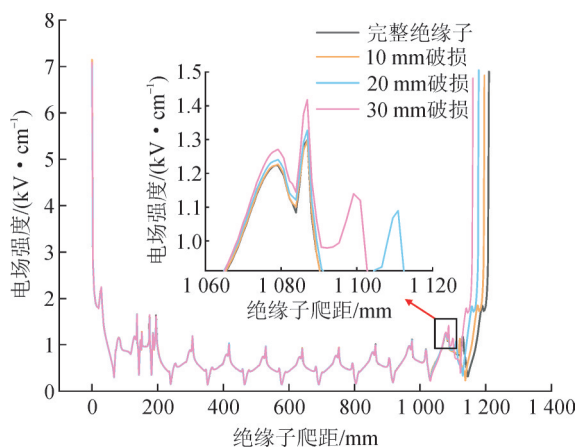


图6 不同破损大小下绝缘子沿面电场分布

Fig. 6 Electric field distribution along the creepage of insulators with different damaged sizes

对不同破损半径的绝缘子进行了仿真分析,分析其破损处的最大场强随着破损半径的增加而波浪式增加。由于破损出现在伞裙边缘,随着破损半径的增加逐渐缩短了爬电距离,会降低绝缘子的表面电阻,产生较大的泄漏电流,最终导致短路,影响铁路安全运行,见图7。

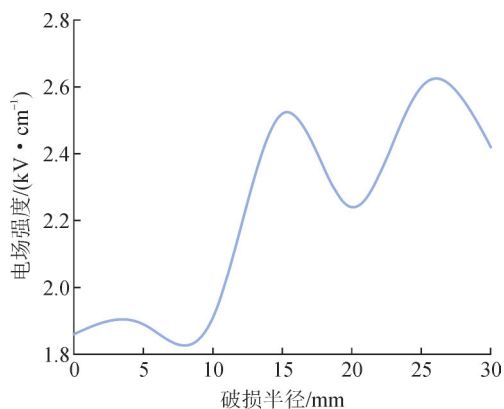


图7 不同破损大小下绝缘子电场影响

Fig. 7 Effect of insulator electric field under different damaged size

2.2 不同伞裙破损的腕臂绝缘子

为方便研究破损半径统一选择为30 mm,分析不同伞裙破损时绝缘子表面电场分布,见图8。

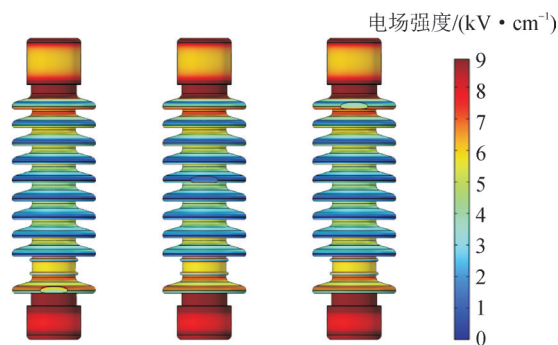


图8 不同破损位置下绝缘子表面电场分布

Fig. 8 Electric field distribution on insulator surface under different damaged locations

由图8可知,当不同伞裙发生破损时对该绝缘子表面电场强度影响程度不一。由上文可知,破损发生在高压端1号伞裙时,其局部最大场强达到2.42 kV/cm,较完整时提升了30.11%。而当破损发生在中压端5号伞裙处时,破损处最大场强仅有0.96 kV/cm;低压端10号伞裙处时,破损处最大场强达到2.58 kV/cm,较完整绝缘子时局部电场强度无明显变化。

分析得到绝缘子沿面电场分布图。其中1号区域为绝缘子1号伞裙破损时破损处沿面电场的变化,其中2号区域为绝缘子5号伞裙破损时破损处沿面电场的变化,其中3号区域为绝缘子10号伞裙破损时破损处沿面电场的变化。由图可知,当高压端出现破损时,其电场分布有较明显增强,而中压端与低压端出现破损时,其破损处的电场分布没有明显变化,见图9。

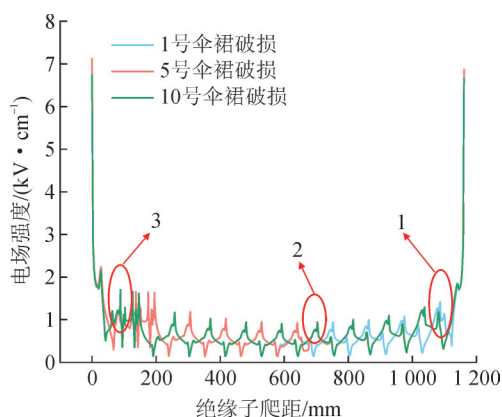


图9 不同破损伞裙下绝缘子沿面电场分布

Fig. 9 Electric field distribution along the surface of insulators under different damaged sheds

从高压端至低压端每片伞裙破损半径为30 mm的情况,当不同伞裙破损时,其局部电场强度变化

不一。当高压端、中压端与低压端伞裙发生破损时,其物理结构发生变化爬电距离缩短,并且绝缘子的沿面电场也发生了相应的畸变。其中越靠近高压端伞裙发生破损时,对绝缘子沿面电场分布影响越为明显。而中压端与低压端发生破损时,对沿面电场影响较小,见图10。

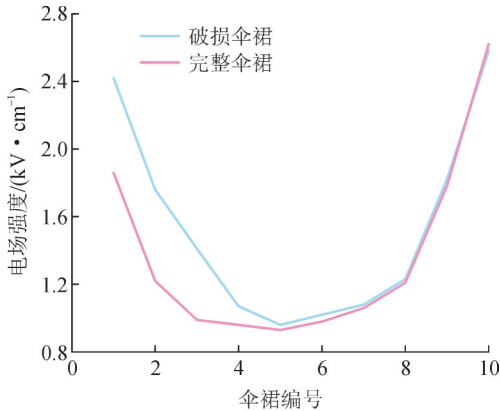


图10 不同破损位置下绝缘子电场影响

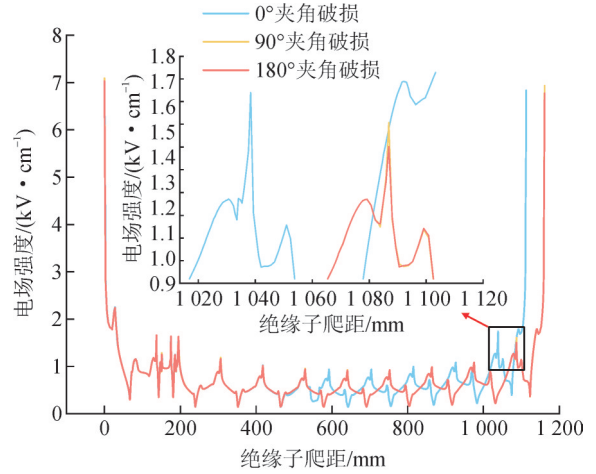
Fig. 10 Effect of electric field of insulators under different damaged positions

2.3 伞裙不同破损组合的腕臂绝缘子

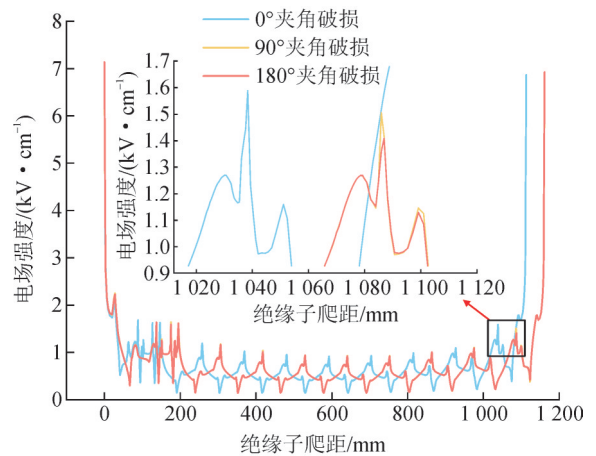
根据伞裙破损统计发现,部分绝缘子可能出现两组伞裙均有可能出现破损情况,且两处破损存在相对位置夹角。为简化研究,文中仅研究破损半径为30 mm,1、5、10号伞裙破损时的情况,并且两处破损位置存在夹角,选取夹角为0°、90°和180°,3种典型情况开展研究。高压端1号伞裙与中压端5号伞裙破损和高压端1号伞裙与低压端10号伞裙出现破损时的沿面电场分布图见图11。

由图11可知,当两破损相对夹角为0°时,绝缘子爬距缩短最大,此时局部电场强度增加幅度最大,随着两夹角不断增大,绝缘子表面爬距由小逐渐增大,其破损伞裙表面最大场强增大幅度也逐渐减小。

当破损位置在高压端1号伞裙与低压端10号伞裙并且夹角为0°时,其局部表面最大场强为2.46 kV/cm,较完整时伞裙最大场强增加了32.26%。当破损位置在高压端1号伞裙与中压端5号伞裙并且夹角为0°时,其局部表面最大场强为2.74 kV/cm,较完整时伞裙最大场强增加了47.31%。由此可知,当破损在1号与5号伞裙时电场强度增加幅度比1号与10号伞裙破损时更大,说明越靠近高压端发生破损,电场畸变会更加严重,见表3。



(a) 高压端1号与中压端5号破损



(b) 高压端1号与低压端10号破损

图11 不同破损组合下绝缘子沿面电场分布图

Fig. 11 Electric field distribution along the insulator surface under different combinations of damages

表3 绝缘子不同破损组合下局部电场强度

Table 3 Local electric field strength of insulators under different damaged combinations

绝缘子伞裙编号	两破损夹角/(°)	破损处最大场强/(kV·cm ⁻¹)
1号与5号	0	2.74
	90	2.15
	180	2.07
1号与10号	0	2.46
	90	2.26
	180	2.23

2.4 潮湿条件下的斜腕臂绝缘子

斜腕臂绝缘子表面易沉积沙尘,污层湿润改变沿面电场分布。为进一步分析绝缘子破损所带来的危害,选取斜腕臂绝缘子高压端1号伞裙为研究对象进行分析。在绝缘子积尘情况下,建立了3种不同模型进行对比分析,见图12。图12(a)为完好绝缘子上表面整体受潮,图12(b)为绝缘子1号伞裙破损并且破损处存在积水,图12(c)为绝缘子1号伞裙破损并且上表面整体受潮。3种状态下绝缘子沿面电场分布图见图13。

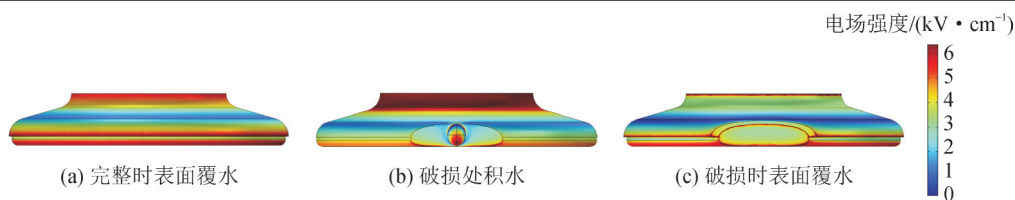


图 12 不同表面状态的绝缘子表面电场分布

Fig. 12 Surface electric field distribution of insulators with different surface states

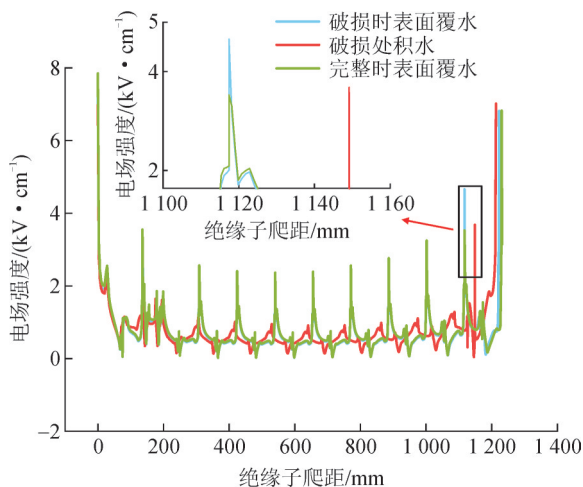


图 13 不同表面状态的绝缘子沿面电场分布

Fig. 13 Electric field distribution along the surface of insulators with different surface states

对比结果表明,当完好斜腕臂绝缘子上表面覆水时,该伞裙处最大场强为 4.06 kV/cm , 相较完整时最大场强提升了 118.28% ; 当绝缘子 1 号伞裙破损并且破损处存在积水时,破损处存在积水,破损处的最大场强为 4.27 kV/cm , 相较完整时伞裙最大场强提升了 129.57% ; 当绝缘子破损并上表面均匀覆水时,破损处电场强度急剧增加,最大场强达到 6.70 kV/cm , 相较完整时伞裙最大场强提升了 260.22% 。由以上结果可知,当斜腕臂绝缘子表面长期积污且存在水雾时,其高电导率的污秽会导致电场强度急剧增加,若伞裙同时存在破损时,绝缘子表面的电场强度更加增大,极易造成危害。

3 结论

文中基于有限元方法研究了不同伞裙破损状态以及受潮状态下西部铁路接触网斜腕臂绝缘子的沿面电场特性。经过分析得到以下结论:

1) 当同一绝缘子伞裙出现半径为 $10\sim 30 \text{ mm}$ 的破损时,破损半径越大,其伞裙表面最大电场强度越大。当靠近高压端的绝缘子伞裙发生破损时,其破损局部电场强度较中压端与低压端都有明显增幅。所以,当斜腕臂绝缘子破损发生在高压端时,破损半径越大,对整体绝缘的性能有较大影响,现

场应用时应当及时更换新绝缘子。

2) 当绝缘子同时发生两处破损,尤其当两破损相对夹角为 0° 时,绝缘子破损处电场强度最大;随着相对位置夹角不断增大,其表面最大场强增大幅度逐渐下降。所以,当有破损出现在高压端时,可及时更换新绝缘子。

3) 受环境影响,绝缘子上表面存在沉积沙尘并被水雾浸润时,绝缘子表面最大场强升高主要受到高电导率水膜的影响。当斜腕臂绝缘子发生破损时,可能会存在污秽长期积累的问题,从而在破损积污受潮时出现电晕放电,所以需要定期对绝缘子进行检查与清洁。

参考文献:

- [1] 孙传铭,张作钦,范超,等. 风沙环境下绝缘子闪络特性及机理研究[J]. 高压电器, 2021, 57(10): 182-188.
SUN Chuanming, ZHANG Zuoqin, FAN Chao, et al. Study on flashover characteristics and mechanism of insulator in wind-sand environment[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(10): 182-188.
- [2] 孙庆峰,刘高明,金江舟,等. 低零值盘型悬式瓷绝缘子发热机理研究[J]. 电瓷避雷器, 2024(6): 138-144.
SUN Qingfeng, LIU Gaoming, JIN Jiangzhou, et al. Heating mechanism of disk suspension porcelain insulator with low (zero) value[J]. Insulators and Surge Arresters, 2024(6): 138-144.
- [3] 谢金鹏,张素慧,李军,等. 某变电站高压跌落式熔断器瓷绝缘子断裂原因分析[J]. 电瓷避雷器, 2024(6): 153-159.
XIE Jinpeng, ZHANG Suhui, LI Jun, et al. Cause of porcelain insulator fracture of high-voltage drop fuse in a certain substation [J]. Insulators and Surge Arresters, 2024(6): 153-159.
- [4] 刘悦,黄新波,刘天娇. 基于深度学习的架空输电线路绝缘子缺陷检测方法研究综述[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(3): 167-177.
LIU Yue, HUANG Xinbo, LIU Tianjiao. Overview on defect detection methods of insulator for overhead transmission lines based on deep learning[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(3): 167-177.
- [5] 严伟,郑毅,张科乾,等. 气体绝缘开关柜支柱绝缘子电场分析及优化设计[J]. 电瓷避雷器, 2024(4): 149-156.
YAN Wei, ZHENG Yi, ZHANG Keqian, et al. Electric field analysis and structure optimization of post insulator in gas insulated switchgear[J]. Insulators and Surge Arresters, 2024(4): 149-156.

- [6] 张友鹏,张鼎昌,董海燕,等. 污秽颗粒在腕臂绝缘子表面分布规律仿真分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(4): 1015-1024.
ZHANG Youpeng, ZHANG Dingchang, DONG Haiyan, et al. Simulation analysis on distribution rules of contamination particles on the surface of cantilever insulator[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(4): 1015-1024.
- [7] 许 竟,高 波,宋臻杰,等. 不同环境因素对复合绝缘子憎水性影响的研究[J]. 高压电器, 2018, 54(2): 103-109.
XU Jing, GAO Bo, SONG Zhenjie, et al. Study on the effect of environmental factors on hydrophobicity of composite insulator[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(2): 103-109.
- [8] 李 刚,李彦哲,李宝学. 积雪腕臂绝缘子电场有限元仿真分析[J]. 电瓷避雷器, 2022(3): 209-216.
LI Gang, LI Yanzhe, LI Baoxue. Electric field distribution characteristics of snow-covered overhead lines cantilever insulator based on finite element method[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(3): 209-216.
- [9] 江 渺,姜昀芑,卢 明,等. 复合绝缘子表面自然积污颗粒的粒径分布规律及机理研究[J]. 高压电器, 2021, 57(12): 17-24.
JIANG Miao, JIANG Yunpeng, LU Ming, et al. Study on particle size distribution and mechanism of natural contaminated particles on the surface of composite insulator[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(12): 17-24.
- [10] 董海燕,张友鹏,李少远,等. 超大伞裙腕臂复合绝缘子积污分布的风洞模拟[J]. 浙江大学学报(工学版), 2019, 53(8): 1563-1571.
DONG Haiyan, ZHANG Youpeng, LI Shaoyuan, et al. Wind tunnel simulation on contamination distribution of cantilever composite insulator with booster sheds[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2019, 53(8): 1563-1571.
- [11] 董海燕,窦建明,王 婉. 平腕臂绝缘子表面的沙尘沉积特性仿真分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(3): 773-779.
DONG Haiyan, DOU Jianming, WANG Wan. Numerical analysis of deposition characteristics of sand-dust on flat cantilever insulator[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(3): 773-779.
- [12] 王 羽,牟 霖,王万昆,等. 附着金属体染污绝缘表面局部电弧特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(11): 3253-3261.
WANG Yu, MU Lin, WANG Wankun, et al. Research on characteristics of partial electric arc on contaminated insulating surface attached with floating potential metal[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(11): 3253-3261.
- [13] 赵多青,曾 杰,许中平,等. 接触网覆冰绝缘子的多物理场分析及伞裙结构优化[J]. 绝缘材料, 2022, 55(7): 78-86.
ZHAO Duoqing, ZENG Jie, XU Zhongping, et al. Multi-physical field analysis and shed structure optimization of ice-covered insulators in catenary[J]. Insulating Materials, 2022, 55(7): 78-86.
- [14] 李晓刚,谢 敏,刘祝鸿,等. 基于BP神经网络模型的复合绝缘子伞裙优化技术[J]. 高压电器, 2022, 58(11): 98-105.
LI Xiaogang, XIE Min, LIU Zhuhong, et al. Optimization technology of composite insulator shed based on BP neural network model[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(11): 98-105.
- [15] 陈 蕊,袁端鹏,阚超豪,等. 模具对盆式绝缘子温度场分布和承压水平的影响[J]. 绝缘材料, 2020, 53(12): 78-84.
CHEN Rui, YUAN Duanpeng, KAN Chaohao, et al. Effect of mould on temperature field distribution and pressure bearing level of basin insulator[J]. Insulating Materials, 2020, 53(12): 78-84.
- [16] 周立玮,叶昊亮,李 特,等. 可见光干扰下复合绝缘子红外测试温度分布特征研究[J]. 智慧电力, 2025, 53(1): 31-37.
ZHOU Liwei, YE Haoliang, LI Te, et al. Temperature distribution characteristics of composite insulator infrared test under visible light interference[J]. Smart Power, 2025, 53(1): 31-37.
- [17] 颜薪瞩,李立涅,李 剑,等. 甲基硅树脂超疏水涂层的防污闪性能[J]. 高电压技术, 2018, 44(9): 2835-2843.
YAN Xinzhu, LI Linie, LI Jian, et al. Anti-pollution flashover performance of methyl silicone resin superhydrophobic coating[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(9): 2835-2843.
- [18] 吴 田,曹探深,劳国威,等. 基于硬质疏水性涂层的配网遮蔽用具的沿面放电特性研究[J]. 高压电器, 2021, 57(4): 21-27.
WU Tian, CAO Tanshen, LAO Guowei, et al. Study on surface discharge characteristic for distribution network cover appliance based on toughing hydrophobic coating[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(4): 21-27.
- [19] 李 娟,廖 峥,张 陵,等. 新疆强风沙尘环境下750 kV线路运维技术[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(2): 123-130.
LI Juan, LIAO Zheng, ZHANG Ling, et al. Operation and maintenance techniques for 750 kV transmission lines under severe wind and sand-dust weather in Xinjiang[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(2): 123-130.
- [20] 王碧霞,田铭兴,冯婷娜,等. GIS盆式绝缘子典型缺陷对其电场分布的影响[J]. 高压电器, 2022, 58(11): 197-204.
WANG Bixia, TIAN Mingxing, FENG Tingna, et al. Influence of typical defects of GIS insulating spacer on its electric field distribution[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(11): 197-204.
- [21] 李明磊,汪从敏,刘 岩,等. 不同劣化方式下复合绝缘子表面电场特性研究[J]. 绝缘材料, 2022, 55(11): 79-85.
LI Minglei, WANG Congmin, LIU Yan, et al. Study on surface electric field characteristics of composite insulator under different deterioration modes[J]. Insulating Materials, 2022, 55(11): 79-85.
- [22] 赵珊鹏,张友鹏,姚晓通,等. 接触网腕臂绝缘子电场分布建模与仿真研究[J]. 铁道学报, 2017, 39(9): 59-66.
ZHAO Shanpeng, ZHANG Youpeng, YAO Xiaotong, et al. Modeling and simulation of electric field distribution of cantilever insulators for catenary[J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(9): 59-66.
- [23] 宋 敏. 有限元分析在接触网绝缘子电场分析中的应用[J]. 电气工程学报, 2019, 14(2): 108-114.
SONG Min. Application of finite element analysis in electric field analysis of contact network insulators[J]. Journal of Electrical Engineering, 2019, 14(2): 108-114.
- [24] 魏 远,张欢畅,黄正勇. 110 kV 覆雪绝缘子串电场有限元仿真分析[J]. 高压电器, 2020, 56(4): 68-73.
WEI Yuan, ZHANG Huanchang, HUANG Zhengyong. Finite element simulation of electric field of 110 kV snow-covered

- BIAN Xiaoyan, SHEN Yunfeng, ZHOU Qibin, et al. Dynamic temperature field calculation and short-time allowable ampacity evaluation of submarine cable based on thermal analytical model[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(2):793-802.
- [13] 吴琼, 李鸣, 高方玉, 等. 配电变压器数字孪生体构建技术研究[J]. 供用电, 2024, 41(1):42-49.
- WU Qiong, LI Ming, GAO Fangyu, et al. Research on digital twin construction technology of distribution transformer[J]. Distribution & Utilization, 2024, 41(1):42-49.
- [14] 李进, 刘松涛, 徐静, 等. 66 kV 高导热风机电缆载流量与温升特性研究[J]. 电气工程学报, 2023, 18(1):244-250.
- LI Jin, LIU Songtao, XU Jing, et al. Research on current carrying capacity and temperature rise of 66 kV wind turbine cable with high thermal conductivity[J]. Journal of Electrical Engineering, 2023, 18(1):244-250.
- [15] 卢斌先, 薛涛, 王宜静, 等. 极端高温下 10 kV 电缆中间接头载流量分析[J]. 电力工程技术, 2023, 42(4):215-222.
- LU Binxian, XUE Tao, WANG Yijing, et al. Current carrying capacity analysis of 10 kV cable joint under extremely high temperature[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(4):215-222.
- [16] 魏艳慧, 郑元浩, 龙海泳, 等. 绝缘层厚度对高压直流电缆电场和温度场分布的影响[J]. 电工技术学报, 2022, 37(15):3932-3940.
- WEI Yanhui, ZHENG Yuanhao, LONG Haiyong, et al. Influence of insulation layer thickness on electric field and temperature field of HVDC cable[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(15):3932-3940.
- [17] 唐科, 文武, 阮江军, 等. 基于有限元法的单芯电缆温度场仿真研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2018, 51(9):811-816.
- TANG Ke, WEN Wu, RUAN Jiangjun, et al. Temperature field simulation of single core cable based on FEM[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2018, 51(9):811-816.
- [18] 王启隆, 王国海, 于竞哲, 等. 多种敷设方式下集群电缆的直流载流量仿真研究[J]. 高压电器, 2022, 58(6):157-164.
- WANG Qilong, WANG Guohai, YU Jingzhe, et al. Research on simulation of DC current-carrying capacity of clustered cables laying under various laying modes[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(6):157-164.
- [19] 付明星, 李悦冬, 潘书磊, 等. 基于 Elman 神经网络的高压电缆导体温度动态计算方法[J]. 高压电器, 2019, 55(10):121-127.
- FU Mingxing, LI Yuedong, PAN Shulei, et al. Dynamic calculation method of high-voltage cable conductor temperature based on elman neural network[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(10):121-127.
- [20] 罗炜, 陈煜敏, 钱海, 等. 基于分数阶导数理论的高频变压器铁心动态 J-A 磁滞模型[J]. 供用电, 2024, 41(6):90-96.
- LUO Wei, CHEN Yumin, QIAN Hai, et al. Dynamic J-A hysteresis model of high frequency transformer core based on fractional derivative theory[J]. Distribution & Utilization, 2024, 41(6):90-96.
- [21] Electric cables-calculation of the current rating-part 2-1:Thermal resistance-calculation of thermal resistance: IEC 60287-2-1:2023[S].2023.
- [22] CENGEL Y. Heat transfer-a practical approach[M]. New York:McGraw Hill, 2003.
- [23] 电力电缆线路运行规程:DL/T 1253—2013[S].2013.
- Code of operation for power cable line: DL/T 1253—2013[S]. 2013.
- [24] 邓永清, 阮江军, 董旭柱, 等. 基于流线分析的 10 kV 油浸式变压器绕组热点温度反演模型建立及验证研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(8):3191-3203.
- DENG Yongqing, RUAN Jiangjun, DONG Xuzhu, et al. Establishment and verification of 10 kV oil immersed transformer winding hot spot temperature inversion model based on streamline analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(8):3191-3203.
- [25] 裴丽君, 徐慧, 陈晗, 等. 基于 PSO 优化的 SA-LSTM 变压器绕组温度预测方法[J]. 供用电, 2025, 42(8):112-119.
- PEI Lijun, XU Hui, CHEN Han, et al. Prediction method for winding temperature of SA-LSTM transformer based on PSO optimization[J]. Distribution & Utilization, 2025, 42(8):112-119.

侯澳港(1999—),男,硕士,主要研究方向为电力设备状态在线监测(E-mail:huaogang@whu.edu.cn)。

董旭柱(1970—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为高电压技术、电力设备状态检测(通信作者)(E-mail:dongxz@whu.edu.cn)。

阮江军(1968—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为多物理场仿真、电力设备状态(E-mail:ruan308@126.com)。

(上接第 142 页)

- insulators string[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(4):68-73.
- [25] 马建桥, 张瑞谦, 王向飞. 鸟窝对 10 kV 铁路贯通线杆塔顶部相间局部区域电场分布特性的影响[J]. 高电压技术, 2023, 49(5):1927-1938.
- MA Jianqiao, ZHANG Ruiqian, WANG Xiangfei. Influence of bird's nest on electric field distribution characteristics in the local area between phases at the top of the tower of 10 kV railway continuous transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(5):1927-1938.
- 段承成(1997—),男,硕士研究生,主要研究方向为电气设备绝缘领域(通信作者)(E-mail:12211449@stu.lzjtu.edu.cn)。